**OPĆENITO**

MC faza VTOL letjelice odvija se prilikom polijetanja, slijetanja te tranzcije VTOL-a. Kako bi VTOL uspješno izvršio tranziciju i postao FW odlučeno je da se prije svega MC faza VTOL-a mora dovesti i tunirati do zadovoljavajućih performansi. Također je odlučeno da će faza tranzicije početi testirati tek kada se MC faza dovede do zadovoljavajućih performansi.

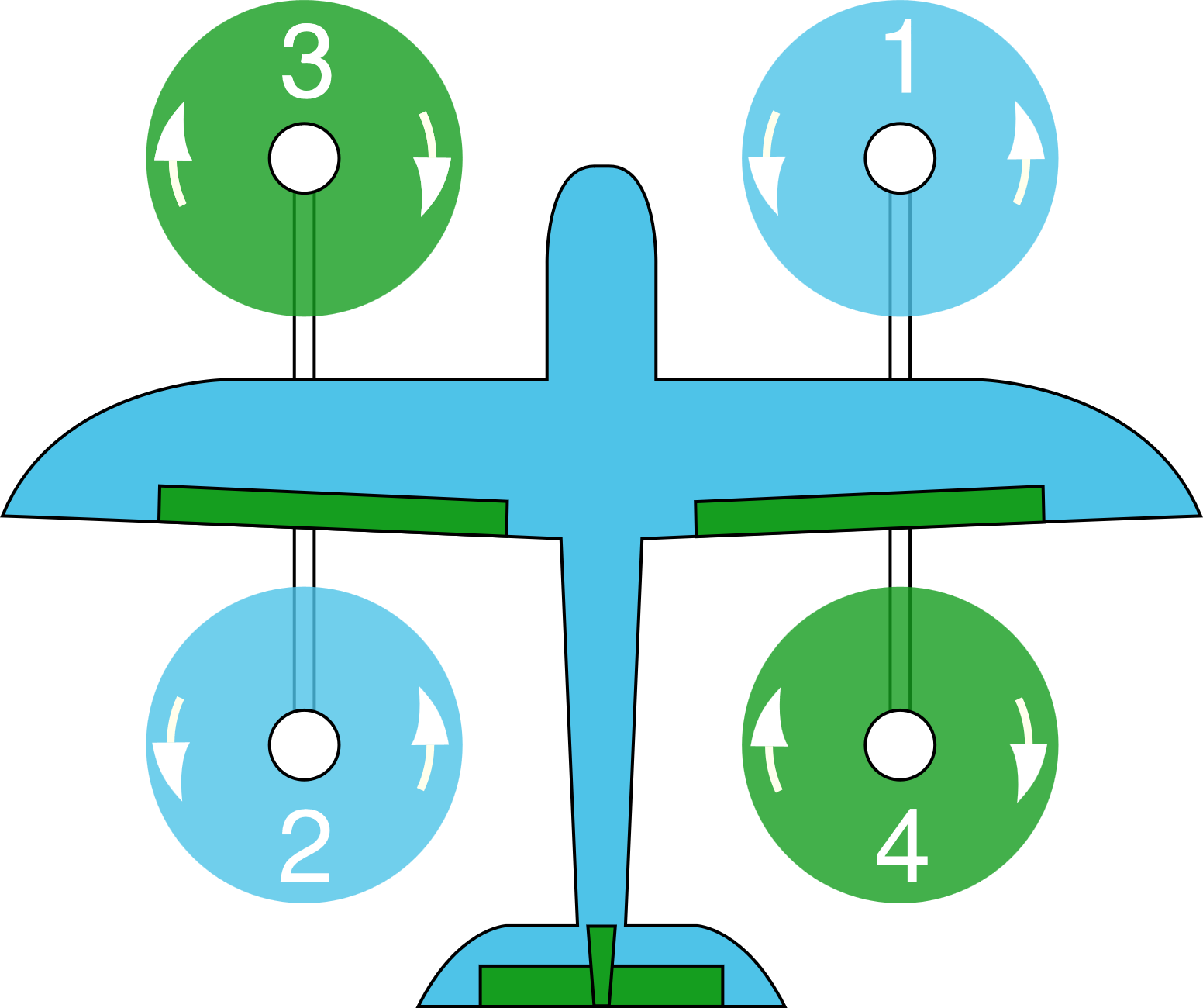
Kako bi VTOL letjelica mogla letjeti trebalo je odabrati prikladan autopilot te prigodni hardware za autopilot i letjelicu. Odlučeno je da se koristi CubePIlot te konkretno CubeOrange pločica ( <https://www.cubepilot.com/#/home> Slika 1), da se za autopilot koristi PX4 open source autopilot ( <https://px4.io/> ) te da se za zemaljsku kontrolnu stanicu za upravljanje VTOL-om koristi QgroundControl (<http://qgroundcontrol.com/> ). Odlučeno je koristiti prije navedene tehnologije zbog toga što su relativno jeftine (open source software i zemaljska kontrola), zato što je konfiguracija poprilično jednostavno i zato što dotične tehnologije podržavaju konfiguraciju za VTOL letjelicu.

A picture containing electronics

Description automatically generated

Slika 1: CubeOrange pločica

Konfiguracija za VTOL letjelicu već postoji u sklopu PX4 autopilota (<https://docs.px4.io/v1.12/en/airframes/airframe_reference.html#vtol>) te u sklopu QgroundaControl-a (odabrani airframe je: Generic quad delta VTOL  
Standard VTOL (13006) Slika 2). Na Slika 2 vidi se raspored vrtnji sva četiri motora koji služe za polijetanje i slijetanje te njihove oznake, te aktuari koji još služe za upravljanje VTOL-om (aileroni, elevatori, rudder te pogosnki peti motor). Popis portova kako se trebaju spojiti svi aktutori nalaze se na: <https://docs.px4.io/v1.12/en/airframes/airframe_reference.html#vtol> pod oznakom Generic quad delta VTOL.



Slika 2: Airframe generic delta VTOL

Prije početka letenja trebao se uploadati pripadni firmware na letjelicu. Firmwarei su vezani uz pojedine verzije softwarea sa PX4 githuba ( <https://github.com/PX4/PX4-Autopilot> ). Firmware koji se koristio je v1.13.0 (alpha) koji je u tom trenutku bio na master branchu na githubu. Zadnji stabilni realse firmwarea je v1.12 koji se u sitnicama razlikuje u odnosu na firmware v1.13. Odlučeno je da kada firmware vezan uz v1.13 postane stabilan (tj službeni release), da će se taj firmware tj ta verzija zaključati i koristiti za VTOL letjelicu.

VTOL konfiguracija sadrži parametre od MC i FW letjelica. Kako je VTOL letjelica već obavila nekoliko letova u FW načinu upravljanja (gdje je doslovno poletila i sletila kao avion) odlučeno je odmah podesiti fw parametre unutar VTOL konfiguracije na parametre koji su se već znali. Ti su parametri bili: Tablica 1. Paremtri se upisuju pomoću QGroundControl-a. Potrebno je spojiti CubeOrange pločicu na laptop koji ima instalirani QgroundControl te pričekati da Qground prepozna pločicu. Zatim se u gornjem desnom uglu odabire Qground izbornik te zatim u novootvorenom prozoru odabiru se Vehicle settings te zatim u izborniku s lijeve strane odabiru se Parameters gdje se može pomoću searcha pronaći željeni parametar i upisati njegovu željenu vrijednost.

Tablica 1: inicijalni FW parametri za VTOL konfiguraciju

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ime parametra | Iznos | komentar |
| FW\_AIRSPD\_MAX | 30 m/s | maksimalna airspeed |
| FW\_AIRSPD\_MIN | 19 m/s | minimalna airspeed pri kojem VTOL u FW modeu može držati visinu tj izjednačiti uzgon sa silom težom |
| FW\_AIRSPD\_STALL | 17 m/s | brzina pri kojoj se gubi uzgon |
| FW\_AIRSPD\_TRIM | 22 m/s | optimalna airspeed (cruise speed) |
| FW\_GND\_SPD\_MIN | 7 m/s | minimalna brzina za polijetanje |
| FW\_MAN\_P\_MAX | 15 deg | Maksimalni kut pitchanja u stupnjevima u manual načinu rada |
| FW\_MAN\_R\_MAX | 55 deg | Maksimalni kut rolla u stupnjevima u ručnom načinu rada |
| FW\_PR\_FF | 0.15 | Feed forward gain vrijednost za pitch rate |
| FW\_RR\_FF | 0.15 | Feed forward gain za roll rate |
| FW\_RR\_P | 0.025 | Proparcionalni gain za roll rate |
| FW\_R\_RMAX | 50 deg/s | Maksimalni roll rate u deg/s |
| FW\_T\_CLMB\_MAX | 3 m/s | Maksimalni climb rate |
| FW\_T\_CLMB\_R\_SP | 2 m/s | Željeni climb rate |
| FW\_T\_PTCH\_DAMP | 0.2 | Faktor prigušenja za pitch |
| FW\_T\_SINK\_MIN | 1 m/s | Minalna brzin spuštanja |
| FW\_T\_SPDWEIGHT | 0 | Odnosno između brzine i visine u odnosu na pitch tj kome pitch daje veći prioritet (0 – daje se isključivo prioritet visini tj pitch se koristi isljučivo za održavanje brziine te se neće koristiti za ispravljanje brzine) |
| FW\_T\_STE\_R\_TC | 0.5 | Vremenska konstatnt filtra prvog reda za specifičnu ukupnu energiju |
| FW\_T\_THR\_DAMP | 0.3 | Faktor prigušenja za pogosnki motor (throttle) |
| FW\_WR\_I | 0.2 | Pojašanje integratora za kotač |

Prije početka leta letjelica se mora kalibrirati tj moraju se kalibrirati njeni senzori. Senzori se kalibriraju prema uputstvima unutar QG Controla. Nakon što se spoji pločica sa QG Controlom odabire se QG izbornik te zatim Vehicle settings te zatim Sensors. Svi senzori koji su označeni crvenom bojom (slova su obojana u crveno) moraju se kalibrirati prema uputstvima koje daje QG Control.

Nakon što se letjelica kalibrira mora ona je spremna za letenje. Kako bi postajala veza između letjelice i QG Controla odnosno između između letjelice i operatora i VTOL-a mora postojati neka upravljačka stanica. Upravljačka stanica koja se koristi je Jeti te se može vidjeti na Slika 3. Kako bi se moglo upravljati letjelicom moraju se pomoću QG Control odrediti što koja palica tj što koji prekidač predstavlja na Jetiju.

A picture containing text, electronics, camera

Description automatically generated

Slika 3: Jeti upravljačka stanica

Osim komandi na jeti se treba odrediti koji je prekidač kill switch, odnosno prekidač koji uklapanjem isključuje letjelicu neovisno jel ona u zraku ili na zemlji. Kill switch je potreban kao sigurnosni mehanizam za slučaj da se letjelica počinje ponašati nestabilno ili onako kako nije sigurno.

Nakon što se setupiraju komande na jetiju trebaju se setupirati i upravljački modeovi. Postoji više različitih upravljačkih modeova u sklopu PX4 te se oni nalaze na: <https://docs.px4.io/v1.12/en/flight_modes/> . TI flight modeovi dijele se na MC i FW flight modeove te isti onda postoje i u VTOL konfiguraciji jer se VTOL sastoji od MC i FW dijela.

Flight modeovi dijele se na automatske i manualne modeove. Automatski modeovi su oni modeovi koji se koriste tijekom misije, odnosno kada nema nikakvog inputa od operatora drona nego samo od željene misije koja se može stvoriti pomoću primjerice QG Controla. Manualni modeovi su oni modeovi u kojima operator upravlja VTOL letjelicom. Postoje razni manualni flight modeovi, no oni koji su korišteni prilikom testiranja MC dijela su:

* Position mode
* Manual/stabilised mode

Ova dva modea korištena su jer se pomoću njih mogu tunirati PID regulatori koji se programatski nalaze u letjelici.

Position (GPS) mode je flight mode u kojem regulator želi održavati MC letjelicu na istom mjestu te u vodoravnom položaju. Pomakom lijeve palice na jetiju prema lijevo odnosno desno uzrokuje promjenu reference položaja MC letjelice prema lijevo odnosno desno tj letjelica se počinje kretati lijevo tj desno uz održavanje iste visine, kad se palica vrati u neutralni položaj to znači da MC ostaje u trenutnom položaju te mu je to novi refenrentni položaj. Ista stvar vrijedi za pomak lijeve palice naprijed odnosno nazad. Pomak desne palice u lijevo odnosno desno uzrokuje rotaciju (yaw) u lijevo tj desno, dok pomak palice gore odnosno dolje uzrokuje promjenu reference željene visine, kad je palica prema gore povećava se referentna visina letjelice, a kada je palica u neutralnom položaju (tj sredini) onda letjelica održava tu željenu visinu.

Manual/Stabilised mode je flight mode u kojem regulator održava MC letjelicu u vodoravnom položaju. Razlika u odnosu na Position mode je ta što u ovom slučaju letjelica ne održava poziciju nego samo vodoravnost, što znači da će primjerice udar vjetra 'odbaciti' MC letjelicu na neki novi položaj ali da će ona ostati vodoravna. Također prilikom mijenjanja položaja lijevo ili desno, letjelica ne održava visinu nego pada (da bi se održala visina treba se koristiti i desna palica). Također u ovom slučaju desna palica u neutralnom položaju gore dolje ne održava željenu visinu. Željenu visinu održava onaj postotak desne palice gore dolje pri kojem je uzgon jednak sili teži (konkretno za VTOL letjelicu bez utega taj postotak je oko 35%).

Iz svega ovoga može se zaključiti kako je stabilised mode teži za upravljanje, odnosno da zahtijeva veće znanje i stručnost operatera, dok je Positon mode jako lagan i intuitivan flight mode. Detaljnije upute o ovim flight modeovima mogu se naće na: <https://docs.px4.io/master/en/flight_modes/>

MC mode koristi se isključivo za polijetanje i slijetanje te prilikom tranzicije u FW mode odnosno prilikom povratka iz FW modea prem MC-u. Zbog toga za MC mode bitno je podesiti PID regulatore kako bi imali željeni odziv za polijetanje i slijetanje da MC bude stabilan prilikom podizanja i spuštanja. Osim toga bitnije je podesiti PID regulatore tako da u MC dijelu oni eliminiraju razne poremećaju u radnoj točki (primjerice nalet vjetra). VTOL konfiguracija nije zamišljena da se kreće u MC modeu što znači da se PID regulatori ne tuniraju za kretanje MC (tj za promjene reference brzine i pozicije) nego za eliminaciju vanjskih smetnji dok se podiže, spušta ili hovera na mjestu.

Testiranje MC dijela VTOL letjelice svodilo se na tuniranje programatski napravljenih PID regulatora unutar VTOL airframea u PX4. U početku tuniranje VTOL-a provodilo se bez montiranih krila, ankon što su se dobili zadovoljavajući rezultati bez krila, montirala su se krila na VTOL te se ponovio proces tuniranja za letjelicu s krilima. Prije početka tuniranja VTOL-a bez krila proces tuniranja proveo se na malom 'običnom' MC-u. U trenutku kad je mali MC model bio zadovoljavajuće tuniran prešlo se na tuniranje VTOL-a bez krila te kad su njegove performanse bile zadovoljavajuće krenulo se dalje na tuniranje VTOL-a sa montianim krilima.

Proces tuniranja PID regulatora za MC dio VTOL-a proveden pomoću PX4 uputa koje se nalaze na: <https://docs.px4.io/master/en/config_mc/> . Prvo se krenulo s tuniranjem pomoću basic tutoriala (<https://docs.px4.io/master/en/config_mc/pid_tuning_guide_multicopter_basic.html> ) te zatim pomoću advanced tutoriala ( <https://docs.px4.io/master/en/config_mc/pid_tuning_guide_multicopter.html> ). Upravljački dijagram je kaskadni te se njagova shema nalazi na: Slika 4. Sustav upravljanja te PID regulatora njihov odnos raspored i međuovisnost detaljno u opisani na: <https://docs.px4.io/master/en/flight_stack/controller_diagrams.html> .

Diagram

Description automatically generated

Slika 4: DIjagram sustava upravljanja

Izlasci na teren i letački dani vezani uz testiranje VTOL-a u MC modeu vezani su uz tuniranje regulatora sa Slika 4 koristeći upute sa linkova iz prethodnog paragrafa.

**PROCES TUNIRANJA PO LETAČKIM DANIMA**

Prije svega VTOL je tuniran kao FW letjelica, atek u kasnijoj fazi kao MC letjelica.

Prvi letački dan kada je VTOL poletio kao MC letjelica bio je osmi letački dan odnosno 18.3.2022. Logovi od tog dana kao i od svih ostalih letačkih dana nalaze se u share folderu: \\sh1king.king-ict.corp\PlanetIX\VTOL\mVtol\Letovi\Skala model 70% .

Kao vježba za tuniranje MC dijela velike VTOL letjelice koristila se mali multicopter (tzv, 'mali quad') koji se nalazi u radioni.

* Osmi letački dan 18.3.2022.

Ovaj letački dan korišten je isključivo za probu da li konfiguracija VTOL-a unutar PX4 radi. Prva 4 loga opisuju probno testiranje odnosno pokretanje logiranja, armanje i disarmanje letjelice na tlu. Zadnji log (log\_56) prikazuje let malog quada u VTOL konfiguraciji kao MC. Ovo je bio prvi pokušaj leta u MC modeu unutar VTOL konfiguracije. S obzirom na to da je bio prvi let, letjelo se primarno u Position (GPS) modeu te se pri kraju leta isprobao Stabilised mode. U ovom letu se samo hoveralo te pri raju leta (u stabilised mode) letjelica se pomaknula nekoliko metara da se isproba ta funcionalnost. U ovom letu tj ovaj letački dan nije bilo tuniranja regulatora.

* Deveti letački dan 1.4.2022.

Ovaj dan je VTOL letjelica poletjela kao MC ali bez krila. Snimke ovih letova nalaze se u: [\\PIXNAS\PIX\_data\VTOL snimke\Skala model VTOL\01\_04\_2022](file:///\\PIXNAS\PIX_data\VTOL%20snimke\Skala%20model%20VTOL\01_04_2022) (mora se biti na wifi tj ne na king mreži da se pristupi ovom folderu).

U Prvom i drugom letu (log\_20 i log\_21) letjelo se u stabilised modeu nekoliko desetaka metara uzduž piste. Razlika između prvog i drugog leta je ta što se u prvom letu koristio mali quad, dok se u drugom letu letjelo sa VTOLom bez krila. Prilikom prvog i drugog leta testirale su se funkcionalnosti Stabilised flight modea (funkcionalnosti su napisane u prethodnom poglavlju te se njihove funkcionalnosti nalaze na gore napisanom linku).

U trećem i četvrtom letu (log\_22 i log\_23) letjelo se u position modeu kako bi se testirale prethodno navedene postion mode funkcionalnosti. Razlika između trećeg i četvrtog leta je ta što se u trećem letu koristion mai quad a u četvrtom VTOL bez krila. Nije bilo tuniranje regulatora.

Peti i šesti let (log\_24, log\_25) letio je VTOL bez krila u stabilised modeu. U ovim letovima počeli su se tunirati regulatori prema uputama koje se nalaze na linku navedenom u prethodnom poglavlju. Regulatori su se tunirali na način da su tijekom leta promijenjeni jedan ili više parametara te se vizualno određivalo i uspoređivalo je li ponašanje letjelice bilo bolje prije ili nakon promjene parametara. Ako se flight logovi otvore pomoću linka: <https://logs.px4.io/> može se točno vidjeti u kojem trenutku dolazi do promjene kojeg parametra (označenu pri vrhu plotova ovisnih o vremenu na trenutku kad se parametar zaista promijenio). U petom letu promijenjen je parametar MC\_ROLLRATE\_D := 0.0024 (sa 0.003) iz razloga što se pretpostavljalo da D komponeneta roll ratea previše utječe na vibracije letjelice. Nije uočena neka pretjerana promjena u ponašanju letjelice nakon promjene parametra. Iz tog razloga za sljedeći let taj parametar je postavljen na nešto manju vrijednost od defaultne (MC\_ROLLRATE\_D := 0.0028). U šestom letu mijenjao se parametar MC\_YAWRATE\_K odnosno proporcionalno pojačanje kutne brzine vrtnje. Ovaj parametar se također mijenjao sve dok vizualnim utvrđivanjem da je reakcija na yaw rate zadovoljavajuća. Na kraju je određen MC\_YAWRATE\_K := 1.9.

* Deseti letački dan 6.4.2022.

U ovom danu nastavljalo se tunirati regulatore prema navedenim uputama. Regulatori su se tunirali u Postion modeu.

U prvom letu (log\_0) VTOL letjelica je ušla u nestabilno ponašanje zbog promjene parametara regulatora prije početka leta. Zaključeno je da se to dogodilo zbog promjene pojačanja na proporcionalnom dijelu pitch rate regulatora te je on nakon leta vraćen na prijašnju vrijednost.

U drugom letu (log\_2) provjeralo se ponašanje letjelice sa staarim parametrima regulatora te je let na kraju bio stabilan što se i očekivalo. U ovo letu proučeni su utjecaji promjene parametara vezani uz orijentaciju pločice, no zaključeno je kako se ti parametri automatski odrede prilikom kalibracije pa ne postoji potreba za njihovim mijenjanjem.

U trećem letu (log\_5) nastavilo se s tuniranjem regulatora. Tunirali su se parametri vezani uz pitch i pitchrate odnosno: MC\_PITCHRATE\_K, MC\_PITCH\_RATE\_D, MC\_PITCHRATE\_I te MC\_PITCH\_P. Oni su se mijenjali sve dok se nije dobilo zadovoljavajuće ponašanje po pitch odnosno dok letjelica nije morala sletiti zbog postotka baterije. Također ovaj dan su spremljeni parametri i stavljeni u share folder gdje se nalaze i logovi. Ovi parametri su karakterizirani kao 'OK parametri' te su se koristili u slučaju kad bi se prilikom tuniranja došlo do kombinacije parametara pri kojoj bi ponašanje bilo loše ili nestabilno.

* Jedanaesti letački dan 7.4.2022.

Nastavilo se sa tuniranjem regulatora kako bi se dobili još bolji parametri odnosno kako bi letjelica bila još bolje tunirana. S obzirom na upute za tuniranje sljedeći letovi koristili su Stabilised flight mode jer se u njemu trebaju tunirati rate regulatori.

U prvom letu (log\_7) tunirali su se svi parametri vezani uz pitch regulatore jer se smatralo da je pitch najkritičniji od svih drugih pomaka. Nakon što se relativno istunirao pitch došlo je do zaključka kako su reakcije letjelice preagresivne, odnosno da previše agresivno reagira na promjene reference i poremećaje.

U drugom i trećem letu (log\_8, log\_9) mijenjali su se parametri zasićenja brzine akceleracije i jerk koji onemogućavaju letjelici da preagresivno reagira na promjene refenrence ili na poremećaj. Ovi parametri mijenjali se u Position mode jer je taj mode najviše 'automatksi' od dva korištena manualn modea čime smo htjeli simularati slučaj kada će VTOL letjeli automatski tj bez operatora.

U četvrtom i petom letu (log\_11 i log\_13) ponovo su se išli tunirati parametri regulatora, ali sada uz nova zasićenja tj limite na brzine, akceleracije rotacije. Ponovo se krenulo tunirati iz stabilised modea kako je navedeno u uputama. Krenulo se sa tuniranjem po pitch rateu (MC\_PITCHRATE\_K, MC\_PITCHRATE\_I, MC\_PITCHRATE\_D) kako bi dobili željeno ponašanje odziva promjene pitcha. Nakon što se dobilo približno željeno ponašanje po pitch rateu, krenulo se na tuniranje roll ratea. Tuniranje roll ratea nije predstavljalo izazov kao što je bilo tuniranje po pitchu.

Na kraju dana skinuti su svi konfigurirani paramtri s letjelice i stavljeni na share folder kako bismo imali parametre koji su bolji od prethodnog dana za back up.

* Dvanaesti letački dan 11.4.2022

Nastavak tuniranja regulatora.

U prvom letu (log\_14) krenulo se sa tuniranjem yaw komponenete regulatora odnosno MC\_YAW\_P.

U drugom letu (log\_15) uključila se opcija okretanja u vjetar (WV\_EN := 1) te se testirala njena funkcionalnost. Uz ovu funkcionalnost PX4 estimira smjer vjetra prema tome u koju stranu se rotira letjelica uspoređujući brzinu vrtnju pojedinog od 4 MC motora. Odnosno ako se šalju komande da MC stoji na mjestu tj ne rotira, a MC se zarotira u lijevu stranu znači da vjetar dolazi s bočne strane, stoga regulator ispravlja letjelicu prema desno (daje komandu za yaw udesno sve dok više ne bude poremećaja od vjetra). MC (tj VTOL) je usmjeren u vjetar kada gleda nosom u vjetar jer tada letjelica ne osjeća bočni poremećaj. Ova funkcionalnost će uključiti na kraju u finalnu letjelicu, no prilikom testiranja nem nije od pomoći jer regulator mijenja manualne inpute (što se u konkretnom trenutku ne zna) što nam može dati krivu interpretaciju rezultata. Uočeno je da funkcionalnost radi kako se od nje i očekuje.

U trećem letu (log\_16) testiralo se u position modeu. Testiralo se kretanje VTOLa u MC fazi lijevo i desno odnosno naprijed i nazad kako bi se snimilo što više prijelaznih pojava koje bi se mogle analizirati pomoću PID analize.

Nakon proučavanja prijelaznih pojava u trećem letu, u četvrtom letu (log\_17) krenulo se na još finije tuniranje regulatora. Tunirali su se roll i pitch rate D komponenete jer se smatralo da D član uzrokuje previše vibracija u sustavu. Također isključeno je okretanje u vjetar radi lakše analize.

U petom letu (log\_22) samo se hoveralo da se prouči utjecaj novih parametara regulatora tokom jednog leta.

* Trinaesti dan 12.4.2022.

U prvom letu (log\_24) VTOL je letio bez krila te su mu davane komande za roll i pitch da se validira da li sve radi ok.

U drugom letu (log\_25) stavljaju se krila te se ponavljaju osnovne komande za roll i pitch kako bi se validirali rezultati. U ovom letu uočavaju se vibracije po rollu na 20 Hz (očito stavljanje krila nekako uzrokuje vibracije od 20 Hz)

U trećem letu (log\_28) stavljaju se limiti na maksimalne akceleracije i maksimalnu brzinu uz pretpostavku da će to smanjiti vibracije po rollu. Ta pretpostavka nije se pokazala točno jer su se vibracije po rollu nastavile. Također ponašanje letjelice je bilo lošije pa je odlučeno da se svi parametri vrate na onakve kakvi su bili

U četvrtom letu (log\_29) vraćeni su parametri na one iz drugog leta no ponašanje je ostalo loše.

U shareanom folderu nalaze parametri uz koje su izražene vibracije na prednjem desnom krilu.

* Četrnaesti letački dan 20.4.2022.